

大気海洋環境研究のための温度成層風洞
(大気海洋システム解析実験設備)

大	屋	裕	二	辰	野	正	和
中	村	泰	治	植	田	洋	匡
鳥	谷		隆	小	園	茂	平
天	本		肇	平	田	勝	哉
深	町	信	尊	石	井	幸	治
渡	辺	公	彦	杉	谷	賢	一郎
岩	本	英	樹	洪	谷	靖	久



九州大学応用力学研究所

所報 第75号 別刷

平成5年9月

大気海洋環境研究のための温度成層風洞 (大気海洋システム解析実験設備)

大	屋	裕	二*	辰	野	正	和*
中	村	泰	治†	植	田	洋	匡†
烏	谷		隆‡	小	園	茂	平‡
天	本		肇‡	平	田	勝	哉§
深	町	信	尊	石	井	幸	治
渡	辺	公	彦	杉	谷	賢一郎	
岩	本	英	樹¶	渋	谷	靖	久¶

概 要

大気海洋環境研究のためには大気、海洋中に現れる様々な成層流の特性を十分に把握する必要がある。この成層流を測定部内に再現し、種々の実験研究を行うために温度成層風洞を建設した。気流特性試験を行った結果、以下の性能を達成できた。1) 弱い成層から強い成層まで広範囲の温度成層流を生成できる。2) 高さ1.2mの範囲において、3 cm間隔で40層の温度分解能を有しているので、様々な鉛直方向温度分布を精度良く生成できる。3) 風速 $U=2.0\text{m/s}$ 以下の安定で一様な気流が供給できる。すなわち、大きな温度差(120°C程度)を低風速($U=0.5\sim 1.0\text{m/s}$)で生成できるのでかなり小さなフルード数の流れが実現できる。4) 気流風速 $U=1.0\text{m/s}$ 以下で、乱れ強さ $u'/U=0.4\%$ 以下の非常に低乱の流れを供給できる。5) 測定部の床面を単位パネル(1 m長さ)毎に4°Cから80°Cまでの広範囲の温度に設定でき、地表面、海表面の熱的状态を再現できる。

Key words : Wind tunnel, Thermal stratification, Air-flow heating. Floor-temperature control.

*九州大学助教授, 応用力学研究所

†九州大学教授, 応用力学研究所

‡九州大学助手, 応用力学研究所

§九州大学助手, 応用力学研究所(現在, 同志社大学工学部)

|| 文部技官, 九州大学応用力学研究所

¶九州大学大学院修士課程, 総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

1. はじめに

地球生態系の危機を示唆する様々な環境汚染、自然災害が発生する中、地球全体が一つの生命体であることを強く感じさせられる。人類は地球という生命システムの中で自然といかに調和して共存できるのか。このためには、自然の本質、地球環境の実態をより深く、より正確に理解する必要がある。

応用力学研究所では大気海洋環境の解明と保全を目指した大型研究に着手している。研究手法は、大気・海洋での現地観測、様々な装置を用いた室内実験、大気あるいは海洋のモデリングによる理論・数値解析から成る。室内実験装置の中でここに紹介する大気海洋システム解析実験設備、いわゆる温度成層風洞は、1992年3月に完成し、大気成層流の動態を研究するための最新鋭の風洞装置である。

大気あるいは海洋では、一般に温度（あるいは密度）が鉛直方向に変化し、成層した状態にある。このような流体中では浮力の効果が顕著となり、中立流には見られない様々な流動現象、乱流輸送、拡散現象が現れる。例えば山岳地域を過ぎる成層流では、風上側の流れのブロッキング、風下側で観察される内部波の発生、だし、おろしなどの強風現象がある。都市域においてはヒートアイランド現象、あるいは都市に特有な大気汚染に成層流が深く関連している。また、海陸風、山谷風、台地平地風などそれぞれの地域に特徴的な局地循環流が存在する。更に大きなスケールではこれらの局地風が結合したより広域的な大規模風系が存在し、大気汚染物質の長距離輸送をもたらしている。また東アジア、北アメリカあるいはヨーロッパにおいて多国間に及ぶ大気汚染物質の移流・拡散現象が報告されており、この数千kmに及ぶ長距離輸送には上空2～3kmに存在する温度の逆転層の寄与が指摘されている。

このような成層流を室内に再現し、研究を行うために従来より様々な実験装置が工夫され、その長所、短所が報告されている^{1)~17)}。これらの成層流実験装置の特徴を吟味し、また本研究所における大気海洋環境に関する研究内容を考慮し、以下に紹介する温度成層風洞を建設することにした。温度成層流を測定部に再現し、実験研究を行うにあたって新風洞の設計指針として以下の項目を挙げた。

1) 弱い成層から強い成層まで広範囲の温度成層流が生成できること（なるべく小さいフルード数が実現できること）。このためには2m/s以下の低速流が安定に供給でき、100°C以上の気流加熱能力が必要となる。2) 測定部床面で地面あるいは海面の様々な熱的状态を再現できること。このためには測定部床面を単位パネルで分割し、それぞれを独立に加熱冷却し広範囲の温度が設定できること。3) 基本場として、長い測定部（10m以上）の中で安定したなるべく乱れの小さい温度成層流が生成されること。したがって測定部の断熱、気流乱れの低減などの工夫が必要となる。以上の点を考慮して完成した温度成層風洞の概要と、種々の気流特性試験を通して得られた風洞諸性能について報告する。

2. 温度成層風洞の概要

2-1. 風洞全体

温度成層風洞の全体図を図1に示す。上流側から空気取入れ部、整流部、縮流部、気流加熱部（成層カート内に設置）、加熱・冷却用床面パネルを敷き詰めた断熱測定部、第2縮流部、第2整流部、送風機および電動機部、下流ダンパー部、そして最下流の吐出部から構成される単回路吸い込み式の風洞である。気流加熱部を有する成層カートは空カート（中に何も設備していない周囲壁だけのカート）と交換

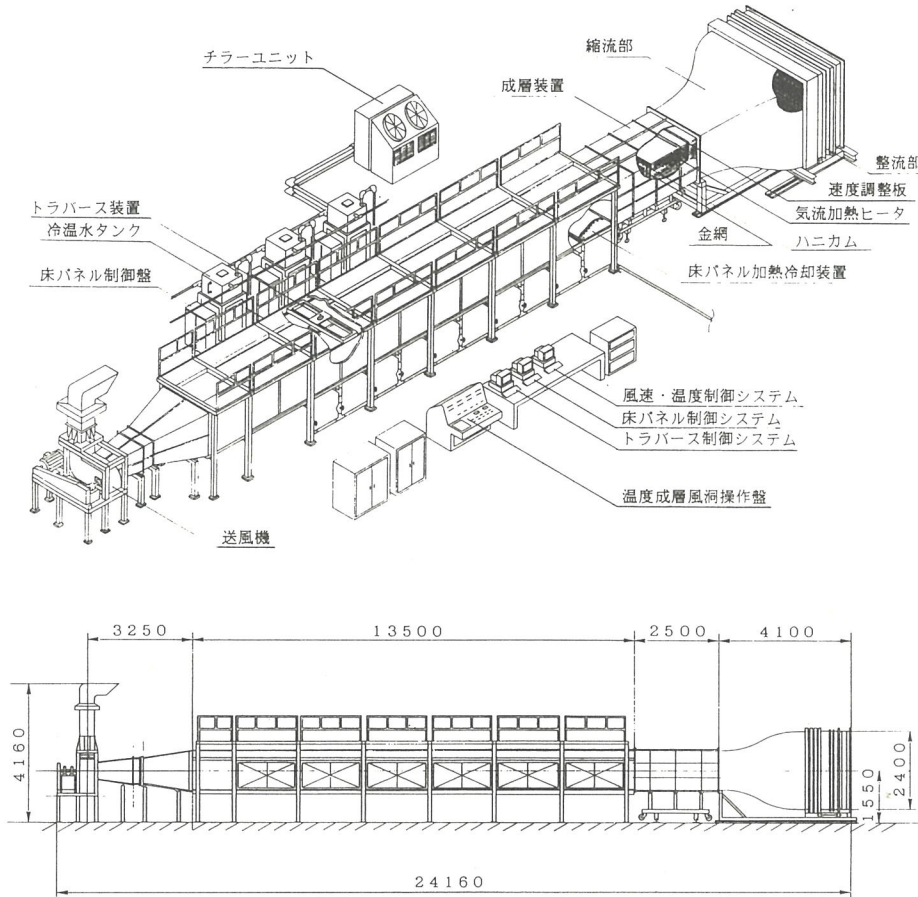


図1 温度成層風洞（上）鳥かん図（下）側面図

可能である。測定部は1.5m幅×1.2m高さ×13.5m長さを有する。風速範囲は $U=0.2\sim 2.0\text{m/s}$ である。また、風速 $U=0.3\text{m/s}$ 以下の微風速は下流吐出部でのダンパー制御で行う。外気の影響を小さくするため、吐出部はかなり加速している。風速の設定は、送風機回転数あるいはモニター用超音波風速計の信号により、パソコン上でフィードバック制御が可能である。本風洞は通常の吸い込み式風洞本体に加え、後述する二つの特殊装置である気流加熱装置、測定部床面パネル加熱冷却装置を有している。

2-2. 空気取入れ部、整流部および縮流部

空気取入れ部では最上流に侵入物を防ぐ粗い金網を設け、そのすぐ下流に粗密の2層のエアフィルターを取り付けた。整流部では建物内部の空間制約上、高さ2.4m×幅3.0mの矩形断面とした。内部には対辺距離9.5mmの正六角形アルミハニカムを流れ方向に長さ80mmで設置した。このハニカムの上流に1

枚, 下流に3枚, 整流用金網を設けた。いずれも線径 $0.3\text{mm}\phi$, メッシュ20の規格である。空気取入れ部と整流部は一体化して制作し, 全体の長さは 1.7m である。縮流部の入口断面の辺長は, 整流部から滑らかに接続して高さ $2.4\text{m}\times$ 幅 3.0m である。したがって縮流部の絞り比は測定部断面の高さ $1.2\text{m}\times$ 幅 1.5m に対し4である。以上の部分は成層カートと空カートの交換が容易に行えるように一体としてレール上の台車に載っており, 風洞軸(流れ方向)方向に水平移動が可能である。

2-3. 気流加熱装置(成層カート)

本装置は, 流入してくる気流を加熱して温度成層を生成する装置で, 測定部のすぐ上流側に設置する。図2に示すようにこの成層カート内部は, 長さ 2.5m の内, 上流 1.5m の部分, 高さ 1.2m の全範囲において 3cm 間隔の水平仕切り板(厚さ 2mm のSUS304)で上下40層に分割している。各仕切り板は長さ 1.5m にわたる温度分布を考えて, 流れ方向に4分割して設置している。各層は上流から速度調整翼, 棒状フィンヒーター, アルミハニカム(対辺距離 3.2mm の正六角形, 長さ 50mm), 白金測温体から構成される。この40層の成層棚の下流に2枚の整流金網(線径 $0.3\text{mm}\phi$, メッシュ20)を設置した。さらに下流の 0.7m の空間部は耐熱用の超音波風速計を取り付ける風速モニター部である。各層における気流温度の設定は, 流れに直角に置いた 3.3kW の棒状フィンヒーターを 10cm 間隔で2本設置し, 白金測温体との間でSSRおよび温調器を用いてPID方式のフィードバック制御を行う。これにより, 各層の気流温度をそれぞれ所定の温度に設定できるため, 十分な温度分解能を有し, 様々な鉛直温度分布を精度良く生成できる。気流加熱能力は風速 $U=2.0\text{m/s}$ 時に最大 70°C 程度の温度差を生成できる。最上流の速度調整翼は対称翼断面を有し, その迎え角を外部のマルチダイヤルゲージで変化させ, 各層の気流抵抗値を変えることにより流速の調整を行うものである。また, ヒーター下流のハニカムおよび2枚の整流金網は成層カー

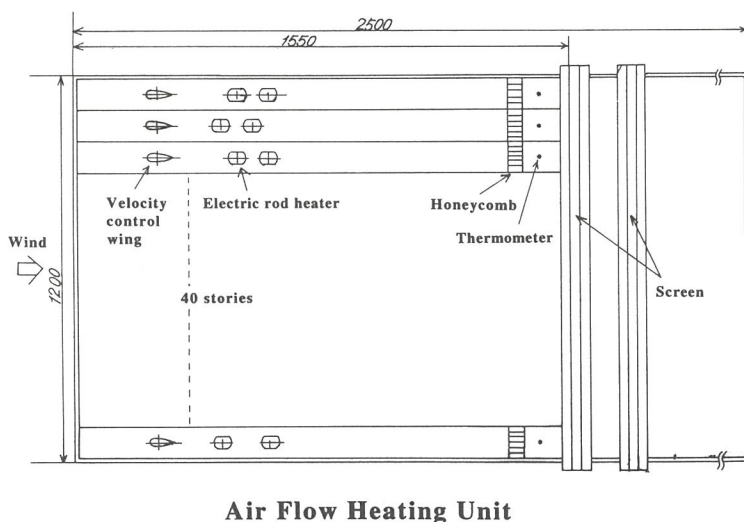


図2 気流加熱装置(成層カート), 側面図

ト内で気流の乱れをなるべく小さくするために設置したものである。成層カートにおけるヒーター下流部の外壁全体は、断熱を考慮して2重構造にし内部にグラスウールを詰めている。

2-4. 床面パネル加熱冷却装置

測定部床面には幅1.5m、流れ方向長さ1mの単位パネルを測定部入口から10枚敷き詰めている。各パネルでは主流に直角方向に多数の溝を設け、そこを冷水あるいは温水が流れるようになっている。その上に厚さ2.5cmのアルミ板を置いて単位パネル内で様な温度が得られるようにしている。設定温度は4°Cから80°Cの範囲で単位パネル毎に独立に制御できる。制御方式はパネル出口での熱電対を温度センサーとし、温調器を用いたPID方式のフィードバック制御である。床面パネルを加熱する場合は、外部でヒーターユニット（各10kw）を用いて加熱した温水を供給する。冷却の場合には、空冷冷却ユニット（19000kcal/h）を用いて冷水を床面パネルに供給する。これらのシステムにより床面温度を広範囲に設定でき、地表面、海表面の熱的狀態を再現できる。

2-5. 測定部

測定部周囲の壁は2種の断熱材の組み合わせた複層構造とし厚さ7.5cmである。流れの可視化実験用に側壁の一方および天井には耐熱ガラスを使用した観測窓を設けた。この窓が必要でない時には断熱材で作った蓋をする。天井部は可動壁で上下に高さを調整できる。通常は4/1000勾配で下流方向に広がっている。測定部内にはトラバース装置を設置した。耐熱用のステッピングモーターでx（主流方向）、y（主流と直角な水平方向）、z（主流と直角な鉛直方向）の3方向の駆動が、それぞれ $x = 0 \sim 12\text{m}$ 、 $y = 0 \sim 1.0\text{m}$ 、 $z = 0 \sim 0.6\text{m}$ の範囲で可能である。測定部内の駆動及び制御用のケーブルはシリコン耐熱マルチコアケーブルを使用した。なお、4章で説明するように、安定な温度成層流を得るために、測定部内部にもう1対の側壁を設けて2重壁にしている。

2-6. 送風機、電動機、吐出部およびその他

第2縮流部は測定部下流断面から第2整流部へ接続する部分で、1.575mの距離で1.2m×1.5mから0.82m正方形断面へ絞っている。第2整流部は送風機のターボファンの影響が上流へ及ぶのを軽減するために設けたもので、ハニカムと金網を設置し、これらの仕様は上流整流部と同じである。送風機部は0.8m正方形断面から送風機流入断面0.48mφに絞った導入部を経て、ターボファンにより、流れを90°曲げ、上方に送風する。送風機はShowa製の耐熱形低圧ターボファンを使用し、最大回転数は1750rpmである。このターボファンは11kwのインバーター方式3相モーターにより駆動する。ダンパー部は微風速の設定用に用いる。風速 $U = 0.3\text{m/s}$ 以下は平板翼列式のダンパーを開閉して調整する。吐出部では内径0.4m正方の矩径ダクトを用い、天井部から屋外に出した後、90°に曲げて雨風がはりにくい構造にしている。また、騒音軽減のため、ダクト内側に75mm厚さのグラスウールを貼り付けた。なお、以上の部分は振動、騒音の遮断のため、機械室として別室に設置している。

風速、気流温度、床面パネル温度およびトラバースの移動はそれぞれ風洞操作盤、あるいはそれぞれ

の制御盤においてマニュアル設定が可能である。通常は3台のパソコン上で簡単に設定条件を入力でき、また設定状況をモニターできる。

3. 中立流風洞としての性能試験結果

3-1. 空カートを使用した場合

縮流部と測定部の間に、成層カートの代わりに空カートを設置した場合の気流特性を調べた。この場合には通常の単回路吸い込み式風洞と同じ構成となる。測定部の入口から1m下流の $x = 1\text{ m}$ の断面において(以後、測定部入口を x 方向の原点とする)、平均風速、乱れ強さの分布を超音波風速計およびカノマックスの熱線流速計を用いて測定した。図3に主流風速 $U_0 = 0.75\text{ m/s}$ の時の結果を示す。コーナ部とその周辺を除いてほぼ一様な風速分布(偏差は $\pm 2\%$ 以内)および乱れ強さを示している。乱れ強さは断面平均(ただし、壁面隣接点の測定値を除く)で 0.35% となった。 $x = 6\text{ m}$, 10 m の下流断面においても同様な測定を行ったが、壁面での境界層の発達により、一様な分布を示す領域は狭まってくる。 $x = 6\text{ m}$ では全断面の内、中央部約 45% 、 $x = 10\text{ m}$ では約 35% の部分が一様な風速領域であった。

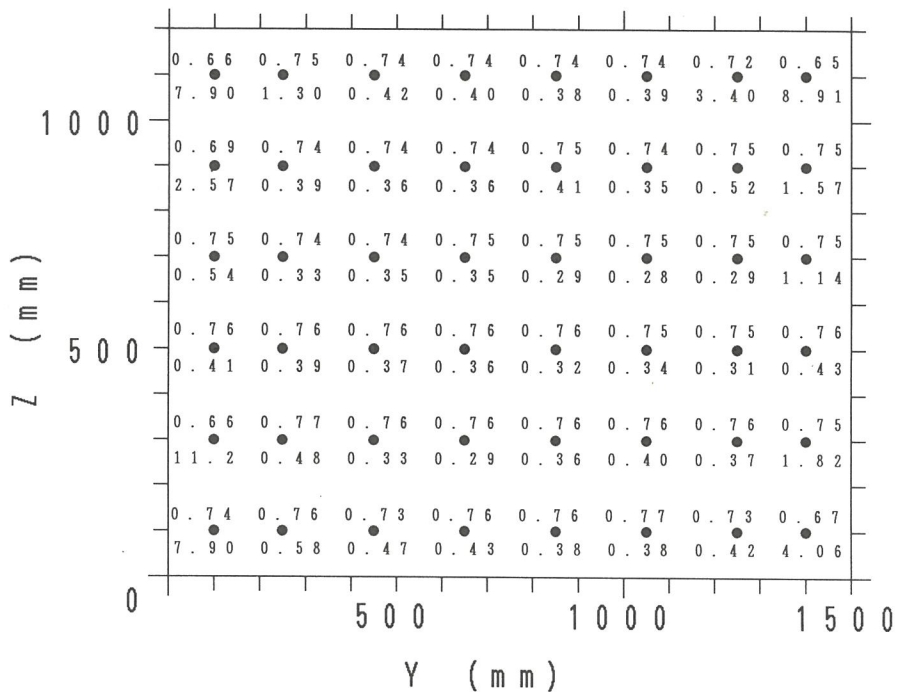


図3 中立流：空カート設置時の平均風速および乱れ強さの断面分布
 $x = 1\text{ m}$, $U_0 = 0.75\text{ m/s}$, 各点の上：平均風速 (m/s), 下：乱れ強さ (%)

3-2. 成層カートを使用した場合

気流加熱部としての成層カートは2-3節で説明したように内部が上下40層に分割され、各層にフィン付き棒状ヒーターが挿入されている。このため、下流は非常に乱れた流れとなる。この乱れを低減化するために各層の終端近くに約3cm厚さのハニカムを挿入し、さらに下流に2枚の整流金網を設置している。図4に示す平均風速、乱れ強さの鉛直分布は3種類のケース、(A)ハニカム、金網がともに無い場合、(B)金網だけ設置の場合、(C)ハニカム、金網の両方を設置した場合、について主流風速 $U_0 = 0.75\text{m/s}$ の場合の結果を示している。平均風速はどのケースもほぼ同様であるが、(A)のケースでは2.5~3.0%程度の大きな乱れ強さである。この乱れ強さはケース(B)で大幅に改善され、さらにケース(C)では平均0.36%程度の非常に低乱の流れとなった。以後はこのケース(C)を成層カートの標準仕様とする。図5には $x = 1\text{m}$ 断面全体の平均風速および乱れ強さの一様性を示す。平均風速 U/U_0 は $U_0 = 0.75\text{m/s}$ で正規化している。3-1節の空カートの場合と同様に、コーナー部及びトラバース用レール付近を除いて風速の偏差は±3%以内となり、ほぼ良好な一様性を示している。壁面隣接点を除いた乱れ強さの断面平均は0.37%となり、成層カートを用いても乱れの小さな気流を供給できる。下流断面での一様性は $x = 5\text{m}$ 、 $x = 9\text{m}$ の断面で調べたが境界層の発達程度は空カートの場合と変わりなかった。図6(a)および図6(b)に床面境界層の下流方向における変化を、主流風速 $U_0 = 0.75\text{m/s}$ の場合について平均風速および乱れ強さ分布で示す。 $x = 1\text{m}$ から $x = 5\text{m}$ の間にはかなり成長し、 $x = 5\text{m}$ と $x = 9\text{m}$ の間ではそれほど変化はない。

本風洞での風速範囲 $U = 0.2 \sim 2.0\text{m/s}$ の間で乱れ強さがどのような変化をするのか図7に示す。空カートの場合も併せて示す。空カートの場合が通常の風洞のようにそれほど変化がないのに対し、成層カートの場合には $U = 1\text{m/s}$ より大きい風速で1%弱のやや大きな値を示す。この原因は成層カート40段の各層内における流れの変化に起因すると思われる。

4. 温度成層流風洞としての性能試験結果

4-1. 風洞気流の可視化

最初に風洞内の気流を可視化して流れのパターンを調べた。これは成層カート入口のスパン中央で鉛直方向にスモークワイヤーを張って白煙を風路内に流し、写真撮影したものである。上方ほど高温となる一定温度勾配（測定部入口で $dT/dz = 50^\circ\text{C/m}$ ）を有する安定成層流で、図8(a-c)に示すように測定部全体にわたって波動が観察された。波長は風速の増大とともに長くなっていることがわかる。この波動の発生原因は次のような理由による。成層カート内において左右の側壁近くで温度が低下し、スパン方向に非一様となるため、成層カート出口下流で側壁に沿って下降流が生じ、これが測定部の断面内部に流れ込んで二次流が発生する。この攪乱によって安定成層流に特有な波動を発生させている。同様な波動現象は文献5), 14) においても報告されている。本風洞ではこの現象を改良するために測定部を2重壁にすることとした。すなわち、成層カート内の整流金網の直後から測定部下流まで耐熱用の透明樹脂およびベニヤ板を用いて内部にもう1対の側壁を設置した。上流で外側内壁から20cm内側、 $x = 9\text{m}$ 下流で14.3cm内側として、風速の下流における加速を考慮してやや広げている。2重壁を設置した

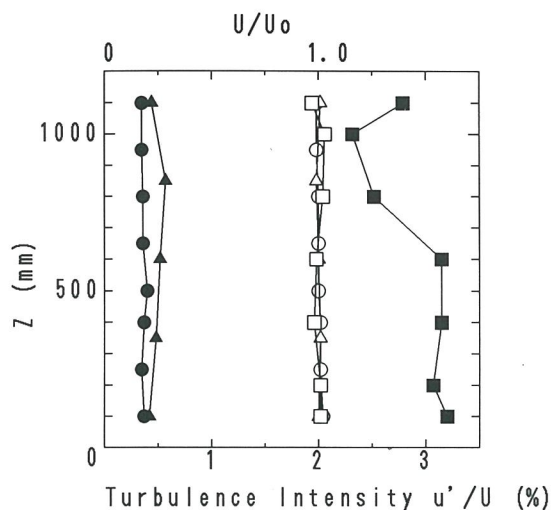


図4 中立流：成層カート設置時の平均風速（白ぬき）および乱れ強さ（黒ぬり）の鉛直分布， $x = 1\text{ m}$ ， $U_0 = 0.75\text{ m/s}$
□&■：ケース(A)，ハニカム，整流金網がともに無い場合の平均風速と乱れ強さ，
△&▲：ケース(B)，整流金網のみ，○&●：ケース(C)，ハニカムと整流金網の両方を設置した場合。

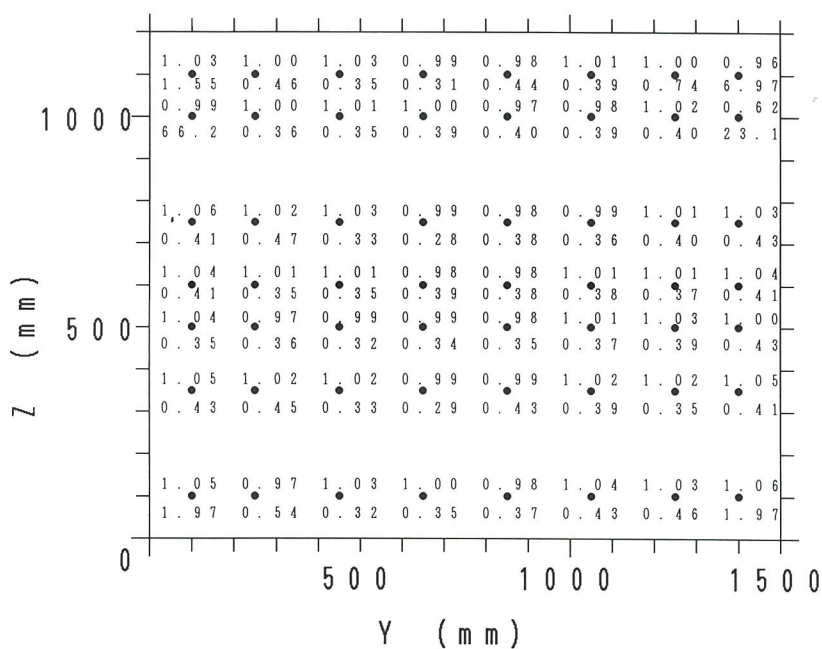


図5 中立流：成層カート設置時の平均風速および乱れ強さの断面内分布
 $x = 1\text{ m}$ ， $U_0 = 0.75\text{ m/s}$ ，各点の上：平均風速 (U/U_0)，下：乱れ強さ (%)。

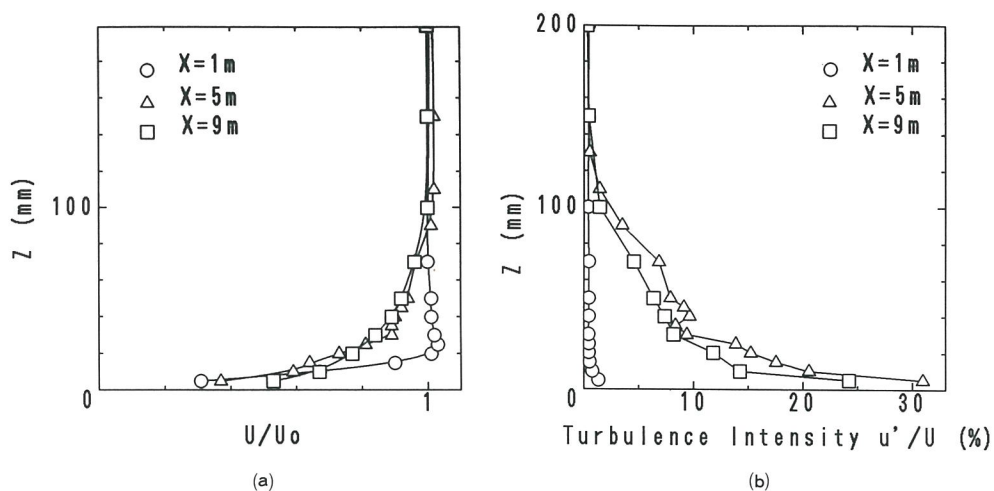


図6 中立流：平均風速および乱れ強さの床面境界層分布， $U_0=0.75\text{m/s}$
(a)平均風速 U/U_0 ，(b)乱れ強さ（％）。

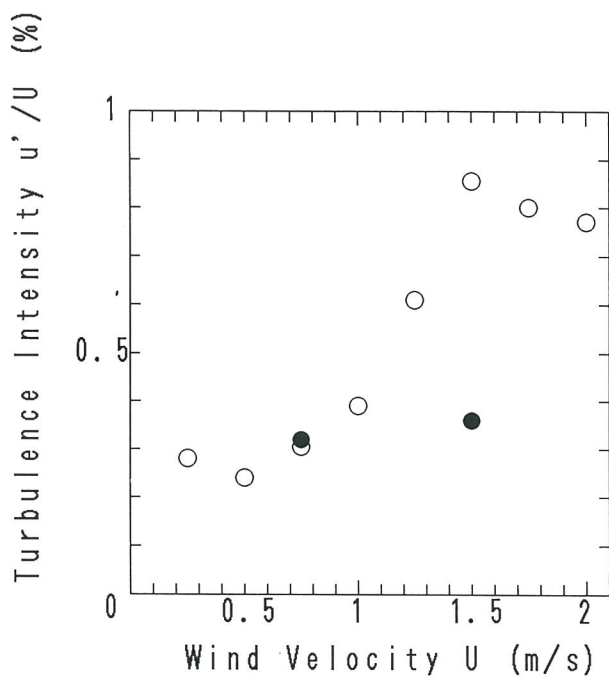


図7 中立流：主流風速に対する乱れ強さの変化， $x=1\text{m}$ の断面中央点
○：成層カート，●：空カート。

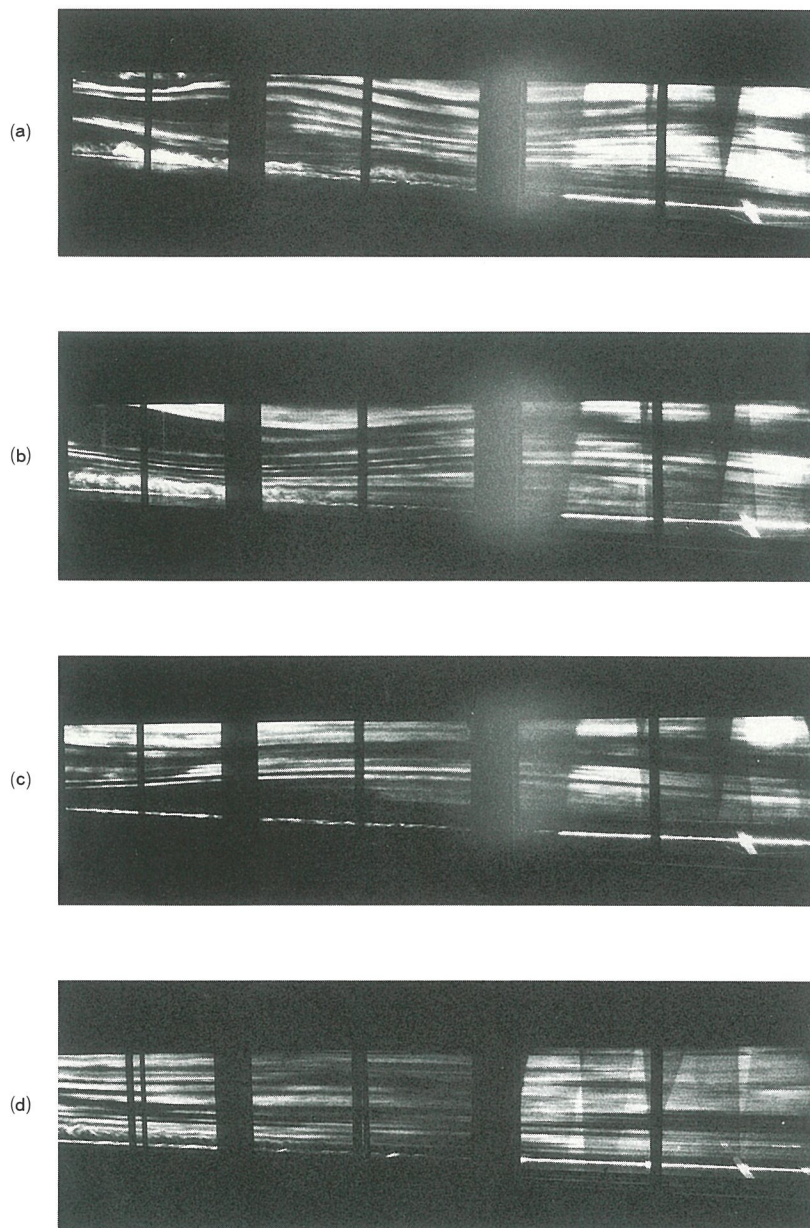
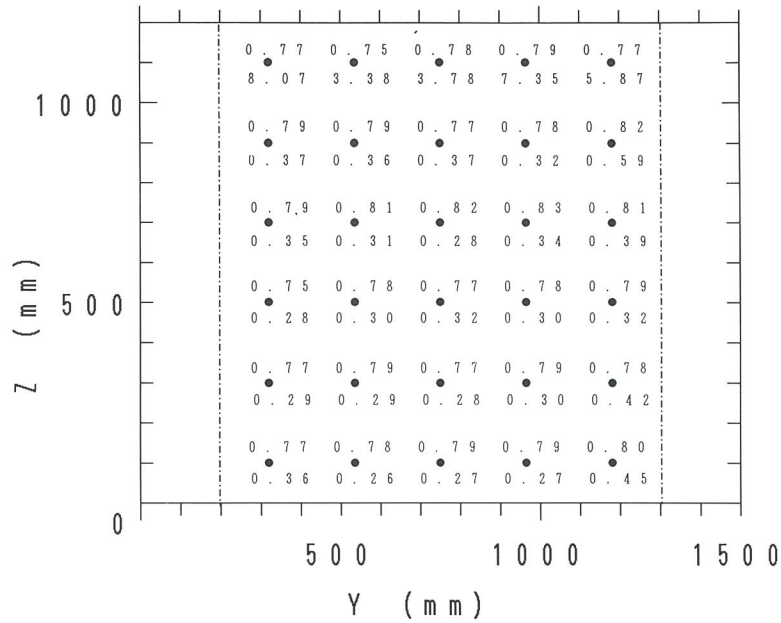
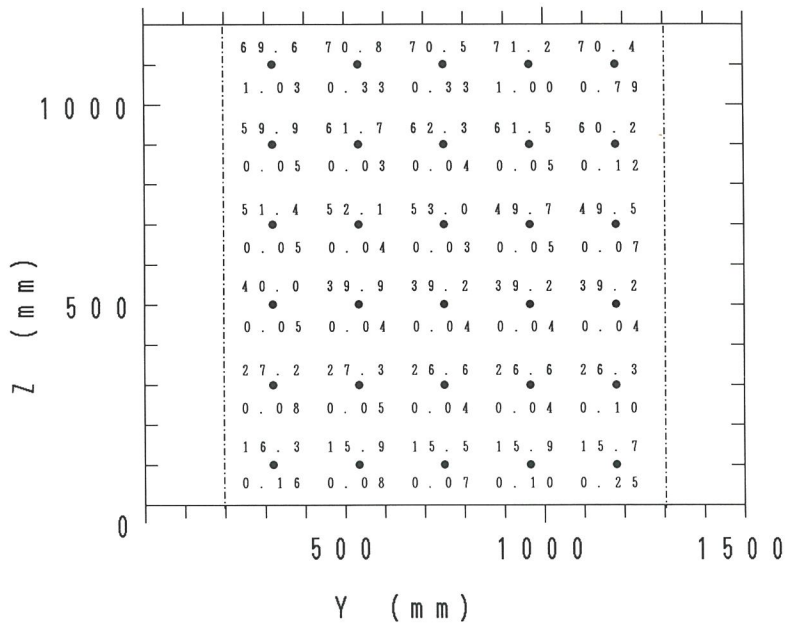


図8 成層流：測定部内の流れパターン．高さ $z = 0 \rightarrow 1.2\text{m}$ で温度 $T = 20 \rightarrow 80^\circ\text{C}$ の設定 ($dT/dz = 50^\circ\text{C/m}$)，流れは右から左へ，上流 6 m の範囲：
 (a) $U_0 = 0.5\text{m/s}$ ，2重壁無し，(b) $U_0 = 0.75\text{m/s}$ ，2重壁無し，
 (c) $U_0 = 1.0\text{m/s}$ ，2重壁無し，(d) $U_0 = 0.75\text{m/s}$ ，2重壁有り．



(a)



(b)

図9 安定成層流の生成, $z = 0 \rightarrow 1.2\text{m}$ で $T = 10 \rightarrow 80^\circ\text{C}$ の一定勾配加熱, $x = 1\text{m}$ での断面内分布
 (a)平均風速 (m/s, 各点の上) および乱れ強さ (% , 各点の下),
 (b)平均温度 ($^\circ\text{C}$, 各点の上) および変動強さ (% , 各点の下)

後、同じ温度勾配条件で図 8 (d)に示すように安定な水平に流れる成層流が実現された。

4-2. 風速, 温度の平均値および変動強さの特性

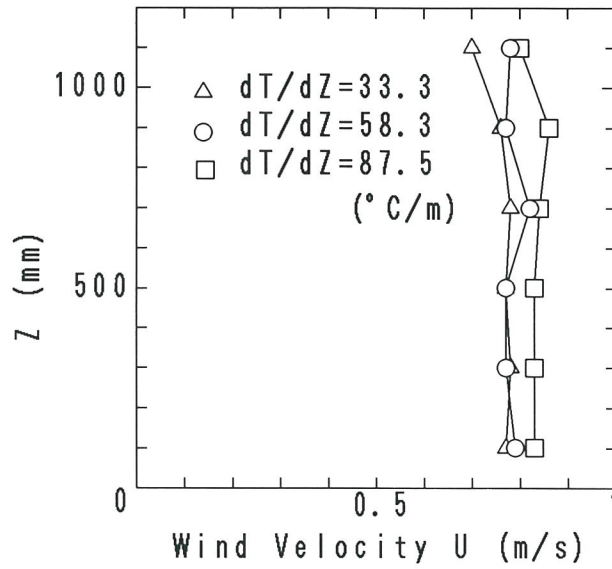
温度成層流では Dantec 社熱線流速計の hot wire および cold wire, 白金測温体, 超音波風速計などを用いて速度, 温度およびそれらの変動を測定し, 詳細な性能試験を実施した。ここに示す図 9 から図 11 は上方ほど高温となる安定成層流に関するものである。図 9 には気流加熱装置で $dT/dz=58.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (底面 10°C から天井面 80°C の温度勾配設定) を設定した安定成層流のケースを示す。図 9 (a)には測定部入口から $x=1\text{ m}$ の断面における平均風速およびその乱れ強さを示す。天井部, コーナー部付近を除いて, 非常に低乱 (平均風速 0.78 m/s で約 0.4% 以下の乱れ強さ) で断面一様性の良い速度分布となっていることがわかる。図 9 (b)には平均温度分布およびその変動強さを示している。安定成層流を設定しているのでそれぞれの高さにおける平均温度はスパン方向にほぼ一様になっており, また温度変動も非常に小さいことがわかる。なお, 温度変動の強さの定義は各点での平均温度からの標準偏差値をその点の平均温度で正規化しパーセント表示したものである。

図 10 (a, b) には, このときの断面スパン中央 ($y=750\text{ mm}$) での平均風速, 平均温度の鉛直分布を示す。他の 2 種類の温度勾配を有する安定成層流のケースも一緒に示している。各 dT/dz の値は気流加熱装置での設定状態である。図 10 (a)ではいずれの安定成層流においても, 天井部付近を除いてほぼ一様な風速分布を示すことがわかる。図 10 (b)の温度の鉛直分布では $x=1\text{ m}$ の断面で小さい方から $dT/dz=33, 56, 85^{\circ}\text{C}/\text{m}$ と設定よりやや小さい勾配となるが, ほぼ一定勾配の温度分布が生成できることがわかる。なお, 天井部付近の気流の乱れは, この付近で周囲大気温度との差が最も大きいため, 熱的な攪乱が発生し易いと思われる。上方が高温となる安定成層流では天井壁にヒーター加熱を施す必要がある。

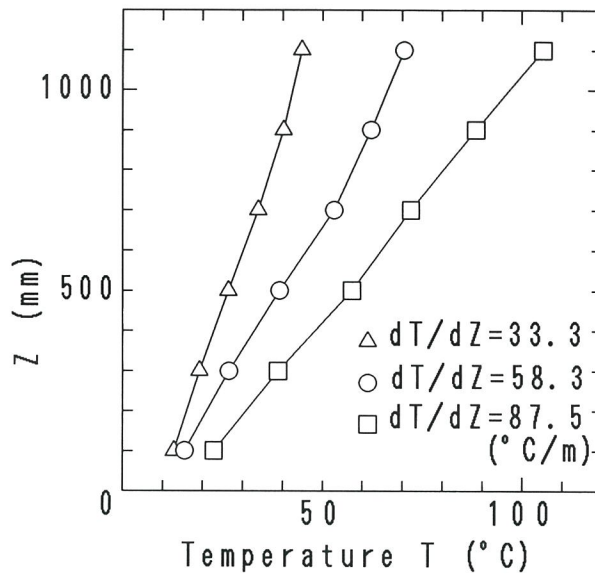
図 11 (a, b) には鉛直方向の温度勾配, 速度分布が下流方向へどのように変化するかを示している。温度勾配はほとんど変化しないが (図 11 (a)), 速度は境界層の発達で下方および上方に低速部が見られる (図 11 (b))。図 11 (b)では, $x=1\text{ m}$ から 5 m にかけて主流の加速がみられるので天井壁および 2 重壁の広がり再度調整する必要がある。

4-3. 種々の温度成層流の生成

さらに温度成層風洞の気流加熱特性の性能をテストするために種々の温度成層流を生成し, その特性を調べた。例として次の二つのケースを示す。一つは, 上下 40 層の気流加熱装置を, 上の 20 層を 80°C , 下の 20 層を 15°C としてステップ的な温度分布を設定した。このときの温度の鉛直分布は, $x=1\text{ m}$ の断面中央で測定した結果, 図 12 (a)に示すように局所的に $dT/dz=570^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の非常に大きな勾配を有した温度分布が実現できた。しかし, 煙写真 (図 13 (a)) を見ると下流方向に行くにつれて徐々に乱れた流れになることがわかる。他の一つは, 上の 24 層を $dT/dz=145.8^{\circ}\text{C}/\text{m}$ という大きな温度勾配を設定し, 下の 16 層を 15°C 一定に設定した。図 12 (b)に示すように, このケースもほぼ設定通りの温度分布が実現でき, $x=1\text{ m}$ 断面では約 $dT/dz=133.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の温度勾配が上方に形成されている。また下流でも安定した成



(a)



(b)

図10 3種の安定成層流の生成, $z = 0 \rightarrow 1.2\text{m}$ で $T = 10 \rightarrow 50^\circ\text{C}$ ($\triangle$), $T = 10 \rightarrow 80^\circ\text{C}$ ($\circ$), $T = 15 \rightarrow 120^\circ\text{C}$ ($\square$)の一定勾配加熱, $x = 1\text{m}$, スパン中央での鉛直分布
(a)風速分布, (b)温度分布

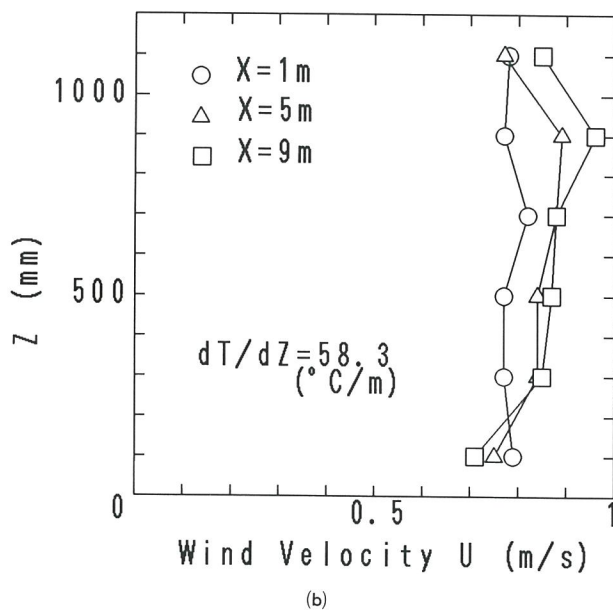
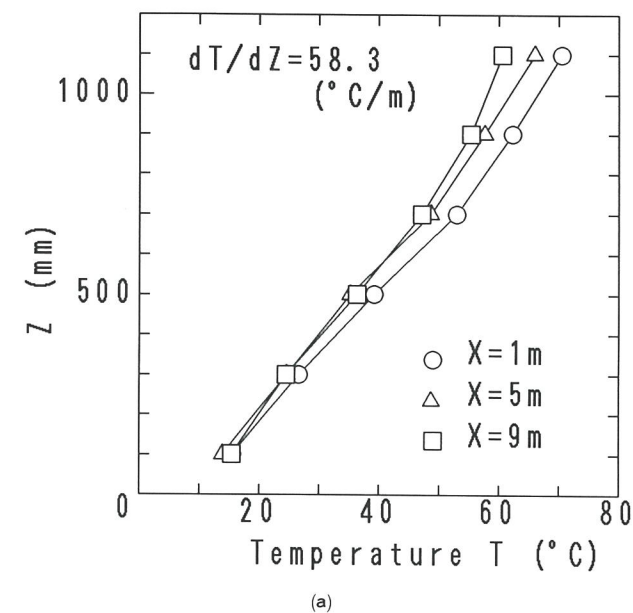
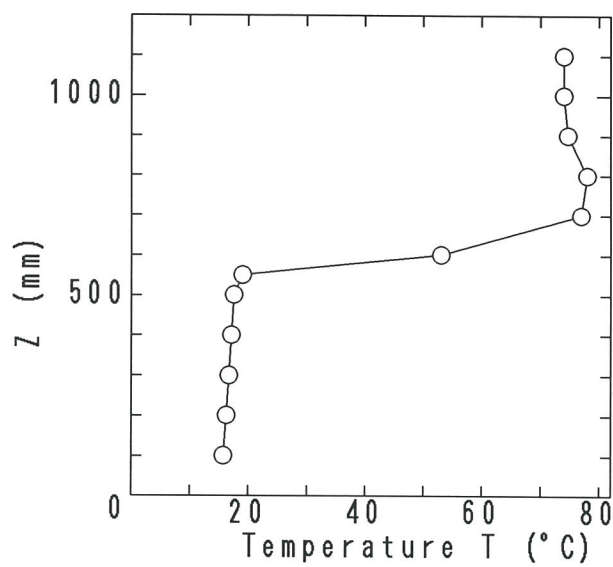
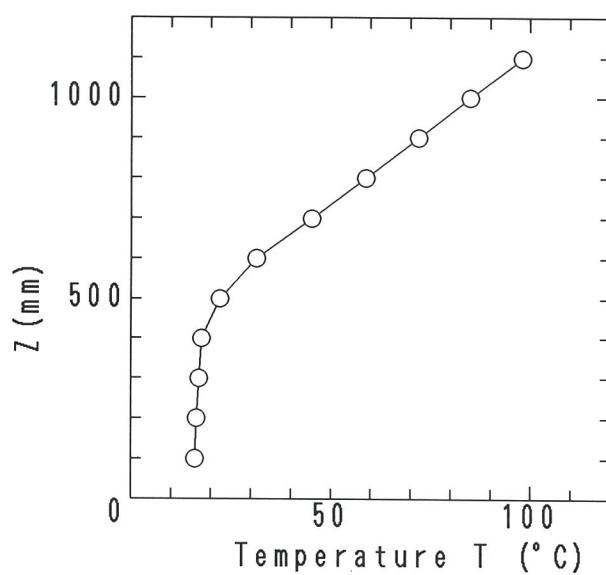


図11 温度，風速鉛直分布の流れ方向変化，図9と同じ加熱条件
(a)温度分布，(b)風速分布



(a)



(b)

図12 種々の温度成層流の生成, $x = 1\text{ m}$, スパン中央での鉛直温度分布, $U_0 = 0.75\text{ m/s}$

(a) ステップ的温度変化, $z = 0 \rightarrow 0.6\text{ m}$ を $T = 15^{\circ}\text{C}$, $z = 0.6 \rightarrow 1.2\text{ m}$ を $T = 80^{\circ}\text{C}$ に設定,

(b) 上方で強い温度勾配, $z = 0 \rightarrow 0.48\text{ m}$ で $T = 15^{\circ}\text{C}$, $z = 0.48 \rightarrow 1.2\text{ m}$ で $T = 15 \rightarrow 120^{\circ}\text{C}$ の一定勾配の設定.

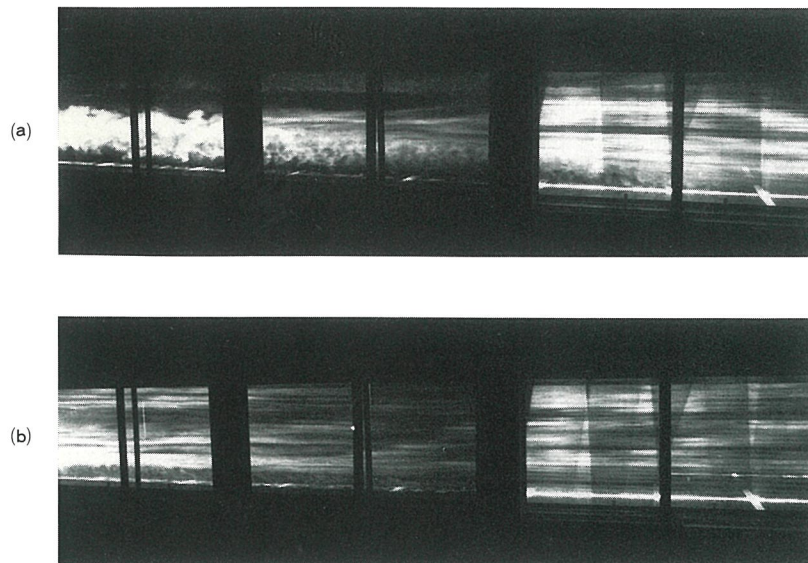


図13 温度成層流の流れパターン（煙写真），流れは右から左へ，上流6mの範囲
(a)温度設定条件は図12(a)と同じ，(b)温度設定条件は図12(b)と同じ。

層流が観察された（図13(b））。

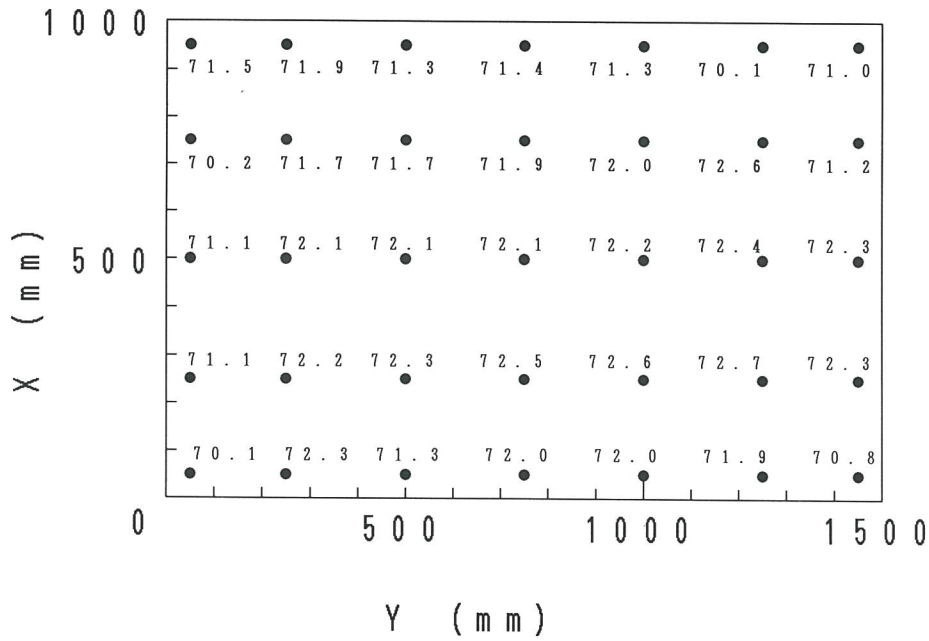
4-4. 床面パネルの温度特性

測定部内における加熱または冷却用の床面パネル（幅1.5m×長さ1mの単位パネル）の温度設定は，低温から高温まで一様性の良い分布が実現できた。例として，図14(a)に平均温度71.7°C，図14(b)に平均温度4.1°Cの設定における単位パネル温度の一様性を示す。図14(a)の高温設定では±2°C以内，図14(b)の低温設定では±0.5°C以内の偏差である。加熱あるいは冷却を始めて，定常な温度状態になるまでには2～3時間程度の時間を要する。

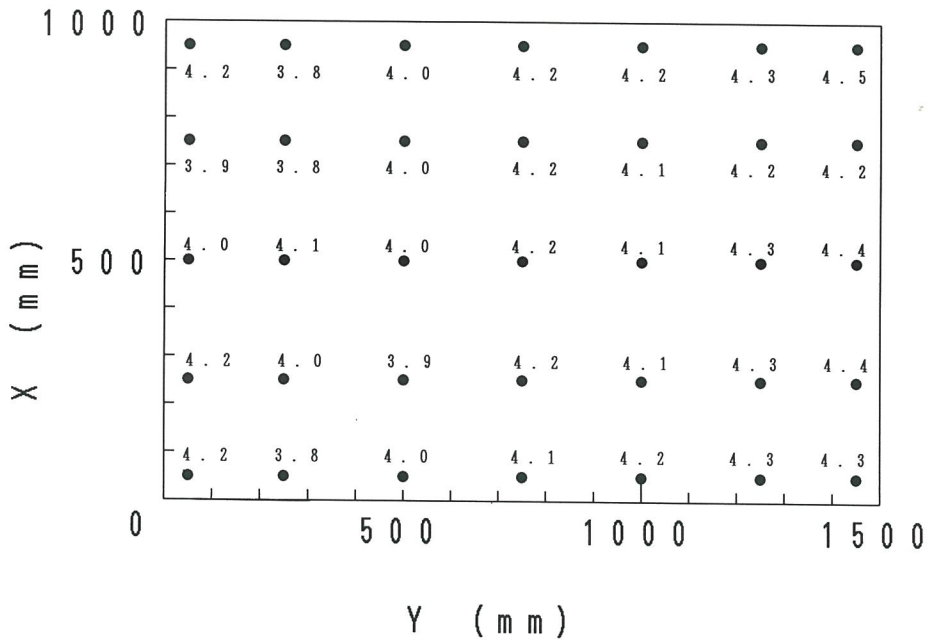
5. ま と め

大気海洋環境のためには，大気，海洋中に現れる様々な流れの特性を把握する必要がある。大気，海洋流体の重要な特徴として温度（あるいは密度）の成層性がある。この成層流を測定部内に再現し，種々の実験研究を行うために温度成層風洞を建設した。気流特性試験を行った結果，以下の諸性能を達成できた。

1) 弱い成層から強い成層まで広範囲の温度成層流を生成できる。2) 高さ1.2mの範囲において，3cm間隔で40層の温度分解能を有しているので，様々な鉛直方向温度分布を精度良く生成できる。3) 風速 $U=2.0\text{m/s}$ 以下の安定で一様な気流が供給できる。すなわち，最大120°C程度の温度差を低風速 ($U=0.5\sim1.0\text{m/s}$) で生成できるのでかなり小さなフルード数の流れが実現できる。4) 気流風速 $U=1.0\text{m/s}$



(a)



(b)

図14 床面パネルの温度分布
(a)温度72°Cの設定（加熱時），(b)温度4°Cの設定（冷却時）

s 以下で、乱れ強さ $u'/U=0.4\%$ 以下の非常に低乱の流れを供給できる。5) 測定部の床面を単位パネル (1m 長さ) 毎に 4°C から 80°C までの広範囲の温度に設定でき、地表面、海表面の熱的状態を再現できる。さらに風洞の操作性、制御の正確さ、流れの測定および可視化実験などに對して十分配慮している。今後は、この温度成層風洞を用いて大気の状態の理解および大気汚染物質の挙動予測などに関する研究を行い、様々な大気海洋環境の解明に寄与していく所存である。

謝 辞

本風洞を建設するにあたり、文部省及び九州大学事務局からは格別の援助を頂いた。また、応用力学研究所元所長伊藤智之教授、総合理工学研究科等事務部、その他研究所内外の関係者及び建設に当たった(株)西日本流体技研の全面的な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Maxworthy, T. and Browand, F. K.: *Experiments in rotating and stratified flows. Oceanographic application.* Ann. Rev. Fluid Mech.. 7 (1974) 273-305.
- 2) Hunt, J.C.R. and Fernholz, H.: *Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: a report on Euromech 50,* J. Fluid Mech. 70 (1975) 543-539.
- 3) Snyder, W.H.: *Fluid modeling of pollutant transport and diffusion in stably stratified flows over complex terrain,* Ann. Rev. Fluid Mech. 17 (1985) 239-266.
- 4) Odell, G. M. and Kovasznay, L. S. G.: *A new type of water channel with density stratification,* J. Fluid Mech. 50 (1971) 535-543.
- 5) Yamada, T. and Meroney, R. N.: *A wind-tunnel facility for simulating mountain and heated-island gravity waves,* Boundary-Layer Meteorology 7 (1974) 65-80.
- 6) Arya, S.P.S.: *Buoyancy effects in horizontal flat-plate boundary layer,* J. Fluid Mech. 68 (1975) 321-343.
- 7) Yoshino, M. et al.: *Meteorological wind tunnel at the University of Tsukuba,* Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba 5 (1979) 28-31.
- 8) Ogawa, Y. et al.: *A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere,* Atmospheric Environment 15 (1981) 807-821.
- 9) Cermak, J. E.: *Wind tunnel design for physical modeling of atmospheric boundary layers,* ASCE 107 (1981) 623-642.
- 10) 尾形俊輔, 他: 風洞設備一気象庁気象研究所納入一, エハラ時報, No.115 (1981) 23-29.
- 11) 田中航二, 佐藤浩: 温度成層流の乱れの構造, なかれ, 2 (1983) 64-77.
- 12) Ohba, R. and Nakamura, S.: *Wind tunnel experiment of gas diffusion in thermally stratified flow,* 3rd Int. Workshop on Wind & Tunnel Modelling of Atmospheric Flow & Dispersion, Lausanne, (1986) 1-7.

- 13) Rau, M., Bachlin, W. and Plate, E.J.: *Detailed design features of a new wind tunnel for studying the effects of thermal stratification*, 4th Int. Workshop on Wind & Water Tunnel Modelling of Atmospheric Flow & Dispersion, Karlsruhe, (1988) 1-8.
- 14) Lienhard V.J.H. and Van Atta, C.W.: *Thermally stratifying a wind tunnel for buoyancy influenced flows*, Experiments in Fluids 7 (1989) 542-546.
- 15) 大屋裕二, 杉谷賢一郎, 中村泰治: 密度成層風洞システムの開発, 九州大学応用力学研究所報, 第68号 (1989) 199-209.
- 16) 蒔田秀治, 森重樹, 新美増信: 安定成層流中の乱流輸送機構, 日本機械学会論文集(B編), 57(1991) 8-15.
- 17) 佐田幸一: 大気対流境界層を模擬するための風洞実験, 日本機械学会論文集(B編), 58(1992) 163-170.

(平成5年6月4日受理)